



## DAİRESEL KESİTLİ BİR SİLİNDİR ETRAFINDAKİ AKIŞ GÜRÜLTÜSÜNÜN SAYISAL VE ANALİTİK OLARAK İNCELENMESİ

Selma Ergin ve Sertaç Bulut

İstanbul Teknik Üniversitesi, Gemi İnşaatı ve Deniz Bilimleri Fakültesi,  
Maslak 34469, İstanbul.

### ABSTRACT

The prediction of the flow-induced noise has been the target of those who have been researching in the field of acoustics for many years. Recently, flow noise around submerged bodies used in marine industries has become commercially and ecologically an important issue. In this paper, the flow-induced noise around the circular cylinder is investigated by using numerical and analytical methods. The acoustic analysis is performed to examine the hydro-acoustic performance of the circular cylinder at various Reynolds numbers. Flow characteristics around the circular cylinder are calculated by employing Computational Fluid Dynamics using finite volume method. The flow-induced noise has been calculated by solving Ffowcs Williams and Hawkings equations. A k- $\epsilon$  sound model based on Proudman analogy is also employed to approximate the total sound power and flow noise generated by turbulent flow past over the circular cylinder, analytically. The results obtained using the FW-H and the k- $\epsilon$  sound methods are presented and compared with experimental and numerical data in the literature. In addition, the effects of receiver distance and flow velocity on flow-induced noise are examined.

### ÖZET

Akış kaynaklı gürültünün hesaplanması ve tahmini, uzun yıllardır akustik alanında araştırma yapanların hedefi olmuştur. Son yıllarda, su altı cisimleri etrafındaki akış gürültüsünün belirlenmesi, denizcilik endüstrisinde ticari ve ekolojik olarak önemli bir konu haline gelmiştir. Bu çalışmada dairesel kesitli bir silindir etrafındaki akış gürültüsü, sayısal ve analitik metotlar kullanılarak incelenmiştir. Akustik analizler, farklı Reynolds sayılarında dairesel silindirin hidroakustik performansını değerlendirmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Silindir etrafındaki akış karakteristikleri, hesaplamalı akışkanlar dinamiği (CFD) yardımıyla belirlenmiştir. Uzak alan akış gürültüsünün sayısal olarak hesaplanmasında ise Ffowcs Williams & Hawkings (FWH) metodu kullanılmıştır. Bunun yanında, Proudman akustik analogisine dayanan k- $\epsilon$  gürültü metodu kullanılarak, toplam akustik güç ve akış gürültüsü seviyeleri analitik olarak hesaplanmıştır. Farklı metotlar kullanılarak elde edilen sonuçlar, literatürde yer alan analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, alıcı nokta uzaklığının ve akışkan hızının akış gürültüsü üzerindeki etkileri incelenmiştir.

### GİRİŞ

Akış kaynaklı gürültünün hesaplanması ve tahmini uzun yıllardır akustik alanında çalışma yapanların hedefi olmuştur. Son yıllarda, denizcilik endüstrilerinde kullanılan su altı cisimleri etrafındaki akış gürültüsü, ticari ve ekolojik olarak önemli bir konu haline gelmiştir. Buna

rağmen, su altı cisimleri etrafındaki akış gürültüsü, tahmin edilmesindeki güçlükler nedeniyle tam olarak anlaşılamamıştır.

Gürültüye neden olan kaynaklar monopul, dipol ve kuadrupol kaynaklar olarak tanımlanmaktadır. Monopul kaynaklar, bir akışkana kütle ya da ısının kararsız girişi ile üretilirler. Cisim akış içerisinde ilerledikçe, akışkanın yer değiştirmesi sonucu oluşmaktadır. Monopul terimleri tahmin edebilmek için cismin geometrik özelliklerini ve hareketini bilmek gereklidir. Dipol terimler ise düzensiz akışların, cisimler ya da yüzeyler ile etkileşime girmesi sonucu oluşurlar. Cisim yüzeyi üzerinde oluşan değişken duvar basıncı ve yüzey kayma kuvveti, dipol kaynakları meydana getirirler. Sınır tabaka içerisindeki hız dalgalanmaları ise kuadrupol gürültü kaynaklarını oluştururlar. Akışkan içerisindeki dairesel kesitli bir silindir etrafında meydana gelen akış gürültüsünde, dipol ve kuadrupol kaynaklar etkilidir. Bu çalışmada gerçekleştirilen hesaplamalarda bu iki gürültü kaynağının etkileri göz önüne alınmıştır.

Akış gürültüsü ile ilgili çalışmalar 1878 yılında Strouhal tarafından bir silindir etrafındaki rüzgar nedeniyle oluşan gürültü seviyelerinin incelenmesi ile başlamıştır [1]. Akustik modellerle ilgili ilk kapsamlı çalışma ise Lighthill tarafından yayınlanmıştır [2]. Proudman, Lighthill'in çalışmalarına dayanarak, düşük Mach sayıları için türbülans ses şiddetinin tahminine yönelik yaklaşık analitik ifadeler üretmiştir. Bu sayede, akış gürültüsü kaynakları, türbülans kinetik enerjisi ve yayılım oranı gibi akışkan karakteristikleri cinsinden ifade edilebilmektedir [3]. P. Croaker, çalışmasında Proudman metodunu kullanarak türbülanslı jet gürültüsü ve düz bir levha üzerindeki akış gürültüsünü incelemiştir [4]. Proudman analojisi, akış kaynaklı gürültü hesabını sürekli durum (CFD) verilerinden hesaplayabildiği için daha kısa sürede sonuç vermektedir ve Lighthill analojisine kıyasla hesaplama etkinliği daha iyidir [3].

Lighthill analojisi temel alınarak geliştirilen Ffowcs Williams-Hawkings(FW-H) gürültü modeli, uzak alan gürültüsünün tahmini alanında çok önemli bir çalışmadır. Bu yöntem, akış denklemlerini çözümleyerek, ses kaynağı yüzeyinde meydana gelen lineer olmayan basınç dalgalanmalarını hesaplar [5]. C. Morfey, yaptığı çalışmasında, türbülanslı akış içerisindeki değişimlerden kaynaklanan uzak alan gürültüsü üzerine yoğunlaşmış, sıcaklık dağılımının uzak alan gürültüsüne olan etkilerini incelemiştir [6]. J. D. Revell, silindirler için uzak alan gürültüsü ile direnç katsayısı arasındaki bağıntıyı incelemek için deneysel çalışmalar yapmıştır [7]. B. Cantwell ve D. Coles yaptığı deneylerde, farklı Reynolds sayılarında bir silindirin iz bölgesi içerisindeki akışın karakteristiklerini incelemiştir [8]. C. Nornberg ve Watanabe ise silindir için değişken kaldırma katsayısı ile Reynolds sayısı arasındaki bağıntıyı deneysel olarak ele almışlardır [9,10]. Y.-T. Lu ve diğ., FW-H metodunu kullanarak geliştirdikleri akustik analiz modeli ile denizaltı etrafındaki akış karakteristiklerini ve akış kaynaklı gürültüyü hesaplamışlardır [11]. Choi, W. ve diğ., yayınladıkları çalışmalarında, su altındaki bir silindir için kuadrupol kaynak terimlerini hesaba katmadan gürültü analizleri gerçekleştirmiş, hesaplamalarında FW-H metodunu ve LES türbülans modelini kullanmışlardır [12]. Chen L. ve I. MacGillivray, bir hidrofoil ve takıntısız denizaltı formu üzerindeki akış gürültüsü kaynaklarını, hesaplamalı akışkanlar dinamiği paketi ve sınır elemanları metodu yardımıyla hesaplamışlardır [13]. Yo-Seb Choi ve diğ., su altındaki dairesel bir silindir formu etrafındaki kuadrupol kaynakların etkisini incelemişler, kuadrupol kaynaklarının hesaplama maliyetlerini azaltan hibrit bir yöntem kullanmışlardır [14]. H. Yao ve diğ., tüm takıntılar ile birlikte bir denizaltı formu etrafındaki akış gürültüsünü sınır elemanları metodu ve FW-H metodu yardımıyla farklı şekillerde hesaplamışlardır [15].

Bu çalışmada, dairesel kesitli bir silindir etrafındaki akış gürültüsü numerik ve analitik metotlar kullanılarak hesaplanmıştır. Akış alanı, iki boyutlu olarak gerçekleştirilmiş olan analizlerde sonlu hacimler metodu kullanılarak çözülmüştür. Türbülans,  $k-\epsilon$  ve  $k-\omega$  türbülans modelleri kullanılarak modellenmiştir. Dairesel kesitli silindir etrafındaki akış gürültüsü, FW-

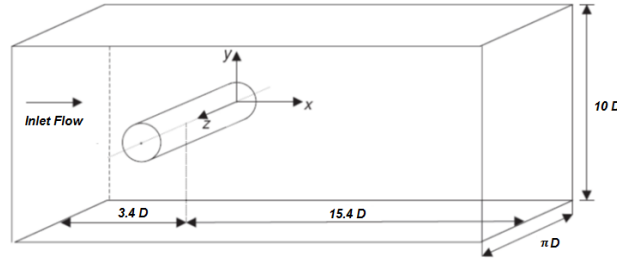
H denklemleri kullanılarak sayısal olarak hesaplanmıştır. Ayrıca akış gürültüsü Proudman metoduna dayalı k-  $\epsilon$  akustik modeli ile analitik olarak da hesaplanmaktadır. k-  $\epsilon$  akustik modeli için sürekli durumda elde edilen akışkan özellikleri, FW-H metodu için ise zamana bağlı olarak hesaplanmış akışkan parametreleri kullanılmaktadır. Her iki metottan elde edilen sonuçlar, literatürdeki sayısal analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Sonuçlar arasında iyi bir uyumun olduğu görülmüştür. Ayrıca, akış gürültüsü değerleri, değişik akışkan hızlarında, farklı noktalarda konumlandırılmış alıcılar için hesaplanmıştır. Bu sayede, akışkan hızının ve alıcı nokta uzaklığının akış gürültüsü üzerindeki etkileri incelenmiştir.

## METODOLOJİ

Dairesel silindir etrafında gerçekleştirilen akış gürültüsü hesaplamaları, iki bölüme ayrılmıştır. İlk kısımda akış karakteristikleri belirlenmekte, diğer bölümde ise akış karakteristikleri kullanılarak akış gürültüsü hesaplanmaktadır. Akış gürültüsünün hesabında iki farklı metottan yararlanılmıştır. İlk metotta, FW-H denklemleri yardımıyla silindirden belirli uzaklıklarda tanımlanmış alıcı noktalarda oluşan uzak alan gürültüsü nümerik olarak hesaplanmaktadır. Diğer yaklaşımda ise akış gürültüsü değerleri k- $\epsilon$  gürültü metodu kullanılarak, analitik olarak hesaplanmaktadır. Proudman(1952) analogisine dayanan k- $\epsilon$  gürültü metodu ile hem dipol hem de kuadрупol gürültü kaynakları hesaplanabilmektedir.

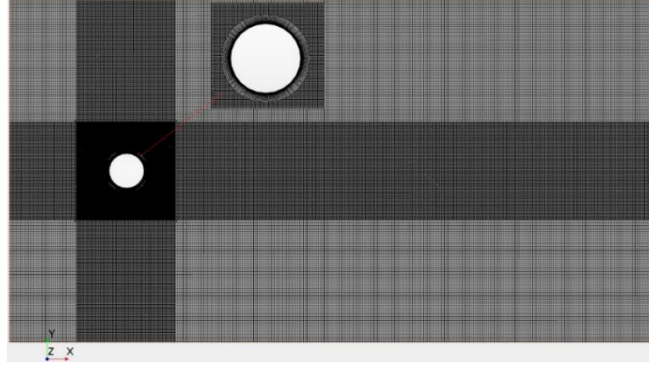
### Hesaplama Alanı

Dairesel kesitli silindir etrafındaki akış karakteristikleri, iki boyutlu çözüm ağı kullanılarak hesaplanmıştır. Analizlerde türbülansın modellenmesi için iki tabakalı “Relizable k-Epsilon” ve “SST k-Omega” türbülans modelleri kullanılmıştır. Süreklilik ve momentum denklemleri arasında hız-basınç bağıntısını kurabilmek için SIMPLE algoritması kullanılmıştır. Taşınım terimlerinin ayıklanmasında ikinci dereceden doğruluğa sahip bir metot kullanılmıştır. Çalışmanın sonuçlarını karşılaştırabilmek için silindirin çapı literatürdeki [7] verilerden yararlanarak 20 mm olarak belirlenmiştir. Akışkan hızı 2 m/sn ile 8 m/sn arasında değişmektedir. Oluşturulan hesaplama alanı, Şekil 1’de detaylı bir şekilde görülmektedir. Dairesel silindir, giriş ve çıkış bölgesinden sırasıyla 3.4D ve 15.4D uzaklığa yerleştirilmiştir. Hesaplama alanı alt ve üst sınırları silindirden 5D uzaklıkta olacak şekilde belirlenmiştir [16].



Şekil 1. Hesaplama Alanı Genel Görünümü

Oluşturulan hesaplama ağı 166629 hücreye sahiptir. Şekil 2’de açıkça görüldüğü gibi, yüksek hız değişimlerinin gözlemlendiği silindir etrafındaki bölgede ve silindir iz bölgesinde ağ iyileştirmeleri gerçekleştirilmiştir. Silindir formundan radyal yönde 1.2 sabit genişleme oranı kullanılmıştır. Yakın bölge akışını doğru bir şekilde hesaplayabilmek için, dairesel kesitli silindir yakınında duvar fonksiyonu  $\Delta y^+ \approx 1$  olarak şekilde bir konumsal ağ çözünürlüğü kullanılmıştır. Radyal yöndeki en küçük hücre boyutu  $r_{\min}/D = 7.45 \times 10^{-4}$  olarak belirlenmiştir.



Şekil 2. Hesaplama Ağı

## Akış Gürültüsü Hesaplama Metodları

### The Ffowcs Williams & Hawkings Metodu

Lighthill analojisini temel alan Ffowcs William ve Hawkings metodu, bir noktadaki uzak alan gürültüsünün tahmin edilmesini mümkün kılmaktadır [5]. Bu yöntemde kaynağı yüzeyindeki lineer olmayan basınç dalgalanmaları, akış denklemlerinin çözülmesiyle elde edilir. Elde edilen çözüm integre edilerek uzak alandaki basınç değişimleri hesaplanır. Hareket eden cisimlerin gürültüleri de bu yöntem sayesinde tahmin edilebilmektedir. FW-H Denklemi, süreklilik denklemi ve Navier-Stokes denklemlerinden türetilmiş, homojen olmayan bir dalga denklemi olarak tanımlanır. Akış alanı içerisinde gürültüye neden olan kaynaklar RANS temelli CFD çözücü yardımıyla belirlenmektedir. FW-H yaklaşımı bu kaynakları kullanarak, cisimden belirli uzaklıklarda tanımlanmış noktalar için gürültü yayılımını ve ses basınç düzeylerini hesaplamaktadır. Bu metod, Farassat 1A formüllerine dayalı olarak çözülmektedir. Denklem 1’de genel ifadesi verilmiş olan bu metod, FW-H integral formüllerini kullanarak uzak alan akustik basınç dalgalanmalarını hesaplamaktadır [17].

$$P'(\vec{x}, t) = p'_T(\vec{x}, t) + p'_L(\vec{x}, t) + p'_Q(\vec{x}, t) \quad (1)$$

Toplam gürültü ifadesi,  $p'_T(\vec{x}, t)$  monopol kaynaklar,  $p'_L(\vec{x}, t)$  dipol kaynaklar ve  $p'_Q(\vec{x}, t)$  kuadrupol kaynakların toplamıdır. Monopol gürültü kaynakları, yer değiştiren bir cisim nedeniyle meydana gelen akış kütlesi tarafından üretilir (Denklem 2). Dipol gürültü kaynakları ise yüzey üzerindeki değişken duvar basıncı ve yüzey kayma kuvveti tarafından oluşturulurlar (Denklem 3). Kuadrupol kaynaklar, akış içerisindeki doğrusalsızlıkların hacimsel bir ifadesidir (Denklem 4). Lighthill’e göre bu doğrusalsızlıklar iki türdür. İlki yerel ses hızının sabit olmaması ve parçacık hızına bağlı olarak değişmesi, ikincisi ise cisme yakın sonlu parçacık hızının, ses yayılım hızını etkilemesidir [2].

$$p'_T(\vec{x}, t) = \frac{1}{4\pi} \int_{(f=0)} \left[ \frac{\rho_0(\dot{U}_n + U_n \bar{n})}{r(1-M_r)^2} + \frac{\rho_0 U_n(r\dot{M}_r + a_0 M_r - a_0 M^2)}{r^2(1-M_r)^3} \right]_{ret} dS \quad (2)$$

$$p'_L(\vec{x}, t) = \frac{1}{4\pi} \frac{1}{a_0} \int_{(f=0)} \left[ \frac{\bar{L}_r}{r(1-M_r)^2} + \frac{L_r(r\dot{M}_r + a_0 M_r - a_0 M^2)}{r^2(1-M_r)^3} \right]_{ret} dS + \frac{1}{4\pi} \int_{(f=0)} \left[ \frac{L_r - L_M}{r^2(1-M_r)^2} \right]_{ret} dS \quad (3)$$

$$p'_Q(\vec{x}, t) = \frac{1}{4\pi} \left( \left( \frac{1}{c} \right) \left( \frac{\partial^2}{\partial t^2} \right) \int_{-\infty}^t \left[ \int_{(f>0)} \frac{T_{rr}}{r} d\Omega \right] d\tau + \left( \frac{\partial}{\partial t} \right) \int_{-\infty}^t \left[ \int_{(f>0)} \frac{3T_{rr} - T_{ii}}{r^2} d\Omega \right] d\tau + \left( c \int_{-\infty}^t \left[ \int_{(f>0)} \frac{3T_{rr} - T_{ii}}{r^3} d\Omega \right] d\tau \right) \right) \quad (4)$$

Yukarıdaki denklemlerde,  $p_0$  uzak alan referans basıncını,  $u_i$  ve  $v_i$  sırasıyla  $x_i$  yönündeki akışkan ve yüzey hız bileşenlerini temsil eder.  $P_{ij} = (p - p_0)\delta_{ij} - \sigma_{ij}$  sıkıştırılabilir gerilme

tansörü,  $u_n$  ve  $v_n$  sırasıyla yüzeye normal doğrultudaki akış ve yüzey hız bileşenleridir.  $\sigma_{ij}$  viskoz gerilme faktörü ve  $\delta_{ij}$  Kronecker ifadesini belirtir.  $a_0$  uzak alan içerisindeki ses hızı ve  $M_i = a_0/v_i$  yüzey Mach sayısı vektörüdür.  $f < 0$  S yüzeyi içerisindeki bir bölgeyi,  $f=0$  S yüzeyini ve  $f > 0$  S yüzeyi dışında sınırlanmayan bir bölgeyi ifade eder.  $T_{ij}$  ise Lighthill gerilme tansörünü temsil etmektedir.

### k- $\epsilon$ Akustik Hesaplama Metodu

k-  $\epsilon$  gürültü modelinde akış gürültüsü kaynakları, hacimsel ve yüzeysel bileşenlerden oluşan kaynakların toplamı olarak ifade edilmektedir.

$$P = \int_S P_s(y_b) ds + \int_V P_v(y) dv \quad (5)$$

Toplam akustik gücün yüzeysel ve hacimsel bileşenleri sırasıyla denklem (6) ve denklem (7)'deki gibi tanımlanmaktadır.

$$P_s(y_b) = B\rho \left( \frac{k_0(y_b)}{c} \right)^3 \quad (6)$$

$$P_v(y) = A\rho \mathcal{E}(y) \left( \frac{\sqrt{k(y)}}{c} \right)^5 \quad (7)$$

Bu denklemlerde  $c$  ses hızını ve  $\rho$  akışkan yoğunluğunu temsil etmektedir.  $k(y)$  ve  $\mathcal{E}(y)$  sırasıyla türbülans kinetik enerjisi ve türbülans yayılım oranına karşılık gelmektedir.  $k_0(y_b)$ ,  $y_b$  konumunda sürtünme hızının dalgalı bileşeninin kinetik enerjisidir [18].

$P_s(y_b)$  ve  $P_v(y)$  noktasal kaynaklar olarak davrandıkları düşünüldüğünde, bir alansal nokta olan  $x$ 'deki akustik ses şiddeti olan  $I$ , denklem (8)'daki gibi belirlenmektedir.

$$I(x) = I_s(x) + I_v(x) \quad (8)$$

$I_s(x)$  ve  $I_v(x)$  sırasıyla alansal nokta  $x$ 'deki yüzeysel kaynaklar ve hacimsel kaynaklar nedeniyle meydana gelen akustik şiddeti temsil etmektedir (Denklem 9 ve 10 ).

$$I_s(x) = \int_S \frac{P_s(y_b)}{4\pi R^2} ds \quad (9)$$

$$I_v(x) = \int_V \frac{P_v(y)}{4\pi R^2} dv \quad (10)$$

Hacimsel ve yüzeysel bileşenlerin toplamı, toplam akustik güç ve toplam akustik şiddeti vermektedir (Denklem 11 ve 12).  $A$ ,  $B$ ,  $C_v$ ,  $C_s$ ,  $F_v$ ,  $F_s$ ,  $q_s$ ,  $r_s$  ve  $s_s$  korelasyon katsayıları literatürdeki model kalibrasyonundan elde edilmiştir [17].

$$P(w) = P_s f_s(w, q_s, r_s, s_s, C_s) + P_v f_v(w, q_v, r_v, C_v) \quad (11)$$

$$I(w) = I_s f_s(w, q_s, r_s, s_s, C_s) + I_v f_v(w, q_v, r_v, C_v) \quad (12)$$

## SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Analiz sonuçları, akış alanı hesaplamaları ve akustik hesaplamalar olmak üzere iki ana başlık altında değerlendirilmiştir. Akış alanı hesaplamalarından elde edilen sonuçlar, akustik hesaplamalar için başlangıç verisi olarak kullanılmıştır.

### Akış Alanı

Akış gürültüsü hesaplamalarının doğruluğu, akış alanı hesaplamalarının doğruluğuna bağlıdır. Kesin bir akış gürültüsü tahmini için, öncelikle akış parametrelerinin doğru bir şekilde ölçülmesi gereklidir. Bu sebeple, akış analizi sonuçları akış karakteristiklerini ifade eden boyutsuz katsayılar açısından literatürdeki deney verileri ile karşılaştırılmıştır. Akış alanı hesaplamalarının kesinliğini değerlendirmek için, Strouhal sayısı ve ortalama sürüklenme katsayısı, karşılaştırma parametreleri olarak kullanılmıştır.

Çizelge 1, iki boyutlu olarak gerçekleştirilen akış analizi sonuçları ile deneysel verileri içermektedir. Kullanılan türbülans modelleri göz önüne alındığında, elde edilen ortalama

sürüklenme katsayısı değerleri deneysel verilerle uyumlu olmakla birlikte,  $k-\omega$  SST modeli kullanılarak deneysel verilere daha çok yaklaşılmıştır.

Çizelge 1. Strouhal Sayısı ve Ortalama Sürüklenme Katsayısı

Strouhal Sayısı		Ortalama Sürüklenme Katsayısı	
Deney (Park <sup>18</sup> ,2012)	0.195	Deney (Cantwell&Coles <sup>8</sup> ,1983)	1.0-1.4
Deney (Nornberg <sup>9</sup> ,2003)	0.180-0.191	Sayısal Analiz, LES modeli 3D (Orselli <sup>19</sup> ve diğ.,2009)	1.08
Sayısal Analiz, $k-\epsilon$ modeli 2D (Orselli <sup>19</sup> ve diğ.,2009)	0.282	Sayısal Analiz, $k-\epsilon$ modeli 2D (Orselli <sup>19</sup> ve diğ.,2009)	0.479
Sayısal Analiz, $k-\omega$ modeli 2D(Orselli <sup>19</sup> ve diğ.,2009)	0.247	Sayısal Analiz, $k-\omega$ modeli 2D (Orselli <sup>19</sup> ve diğ.,2009)	0.944
<b>Bu çalışma, <math>k-\epsilon</math> modeli 2D</b>	0.286	<b>Bu çalışma, <math>k-\epsilon</math> modeli 2D</b>	0.679
<b>Bu çalışma, <math>k-\omega</math> modeli 2D</b>	0.254	<b>Bu çalışma, <math>k-\omega</math> modeli 2D</b>	1.229

Elde edilen Strouhal sayısı değerleri deneysel sonuçlardan az miktarda yüksek olmakla birlikte, Orselli'nin gerçekleştirdiği analizler ile uyumludur. Casalino'ya göre oluşan bu fark, ortalama Reynolds gerilmelerinin iki boyutlu simülasyonlarda, üç boyutlu simülasyonlara göre daha yüksek olması ve bunun sonucunda daha yüksek kopma frekansı tahminine sebep olmasının bir sonucudur [20].

### Akış Gürültüsü

Akış gürültüsü hesaplamaları için kullanılan ilk yaklaşım FW-H denklemlerine ve onun integral çözümüne dayanmaktadır. FW-H denklemleri, süreklilik ve momentum denklemleri kullanılarak elde edilir ve temelde homojen olmayan bir dalga denklemidir. İkinci yaklaşım ise Proudman modelini temel alan  $k-\epsilon$  akustik modelidir ve dairesel kesitli silindir tarafından üretilen gürültüyü hesaplayabilecek şekilde genişletilmiştir.

$k-\epsilon$  ve SST  $k-\omega$  türbülans modelleri yardımıyla elde edilen akış karakteristikleri, akustik hesaplamalar için kullanılmıştır. Akustik hesaplama sonuçlarını doğrulama çalışmaları için, W.S Choi ve diğ.'nin gerçekleştirmiş olduğu akış gürültüsü analizleri seçilmiştir [12]. Buna uygun olarak, silindir çapı 20 mm ve alıcı noktalar silindirin alt bölgesinde, silindirden sırasıyla 100 mm, 200 mm ve 400 mm uzaklığa yerleştirilmiştir.

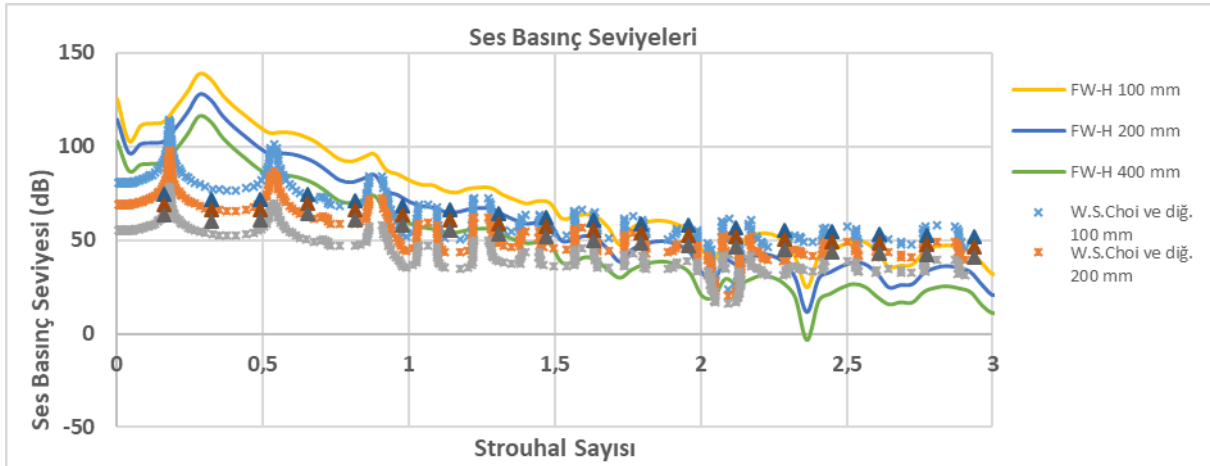
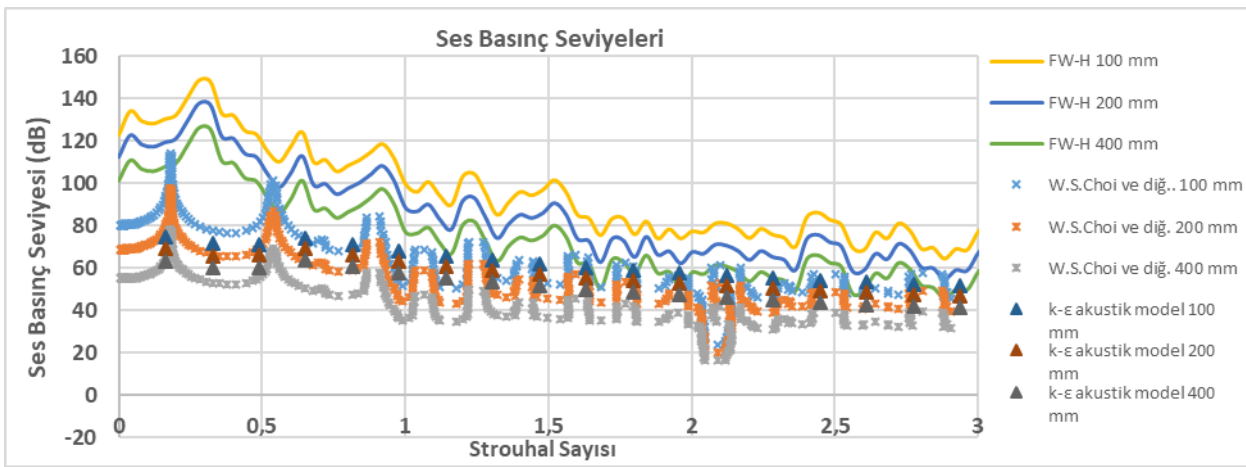
Akustik sonuçlar, desibel ölçeğinde ses basınç düzeyi cinsinden sunulmaktadır. Ses basınç düzeyleri aşağıdaki şekilde ifade edilirler;

$$SPL = 20 \log(P_e/P_{ref}) \quad (13)$$

Denklem 13 içerisindeki,  $P_e$  efektif ses basıncını,  $P_{ref}$  ise su için 1  $\mu Pa$  olmak üzere referans basıncı temsil etmektedir. Akustik spektrum, monopol, dipol ve kuadropol kaynakları göz önünde bulunduracak şekilde sunulmuştur.

Şekil 3 ve Şekil 4, analitik ve numerik hesaplama sonuçları ile W.S.Choi ve diğ.'nin analiz sonuçlarını içermektedir. Analizler  $9 \times 10^4$  Reynolds sayısında gerçekleştirilmiştir. Ses basıncı seviyeleri, boyutsuz Strouhal sayısına bağlı olarak sunulmuştur.  $k-\epsilon$  türbülans modeli ve  $k-\omega$  SST türbülans modeli kullanılarak gerçekleştirilen sayısal hesaplamalardaki genel frekans karakteristikleri, alıcı noktalar boyunca sabit pik frekansları ile birlikte benzer sonuçlar vermiştir. Geniş bantlı gürültü harmoniği diğer analiz sonuçları ile uyumludur. Buna rağmen,  $k-\omega$  SST türbülans modelinden elde edilen ses basıncı seviyeleri,  $k-\epsilon$  türbülans modeline kıyasla biraz daha yüksektir.  $k-\epsilon$  akustik modeli kullanılarak gerçekleştirilen analitik hesaplamalarda, metodun özellikle geniş bantlı gürültü ve harmoniği ile ilgili daha uyumlu sonuçlar verdiği görülmektedir. Buna rağmen, kalibrasyon katsayıları optimize edilerek daha yakın sonuçlar elde edilebilir.

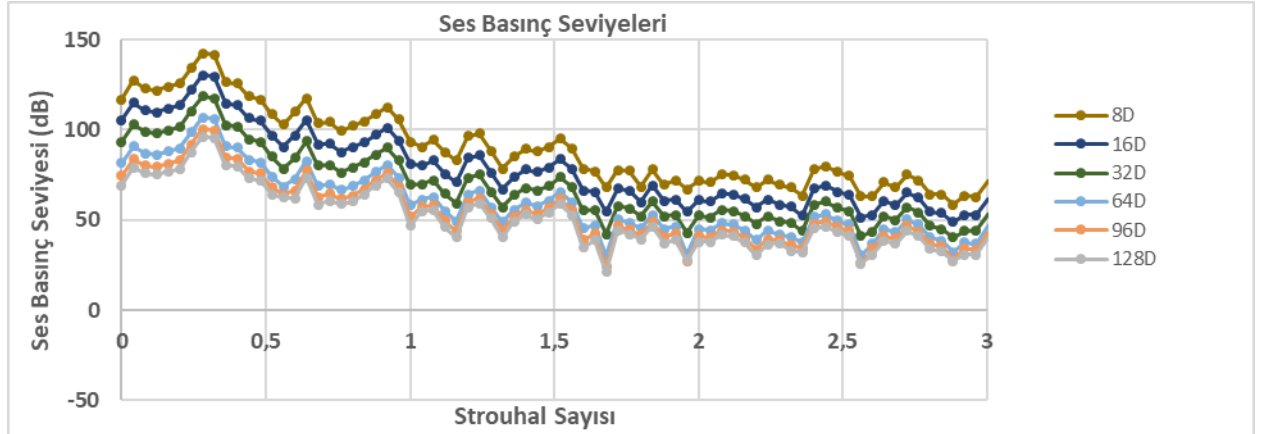
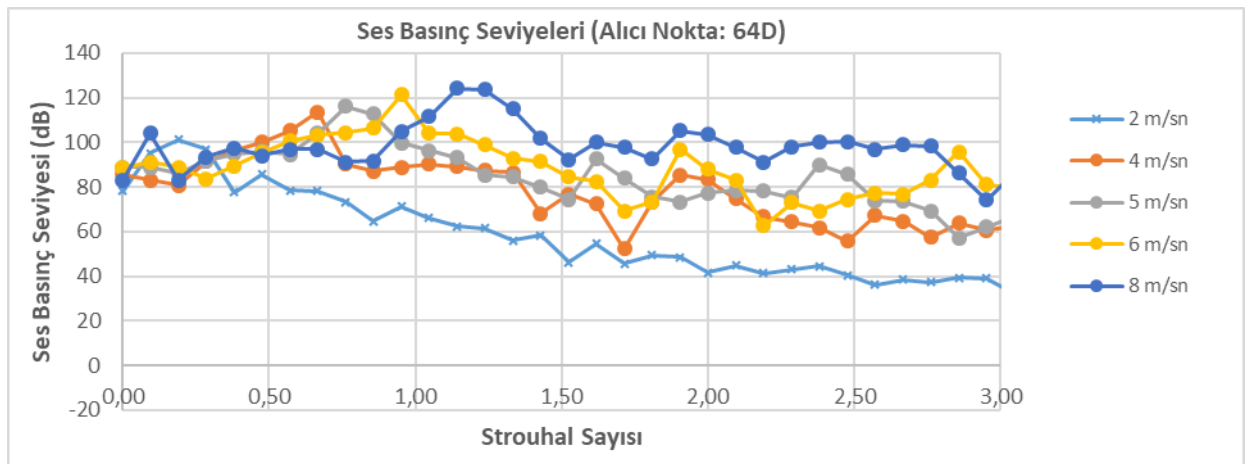


Şekil 3. Ses Basınç Seviyelerinin Karşılaştırılması (k- $\epsilon$  türbülans modeli)Şekil 4. Ses Basınç Seviyelerinin Karşılaştırılması (SST k- $\omega$  türbülans modeli)

Şekil 5'te,  $9 \times 10^4$  Reynolds sayısında gerçekleşen bir akışta, alıcı nokta konumunun akustik karakteristikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Değişik alıcı noktalar 8 ile 128 silindir çapı aralığında konumlandırılmıştır. Alıcı noktaların uzaklığı değiştikçe akustik karakteristiklerin aynı kaldığı görülmektedir. Buna rağmen, ses basıncı düzeyleri alıcı nokta silindirden uzaklaştıkça azalmakta, ses basıncı seviyelerindeki bu düşüş eğilimi ise alıcı noktalar silindirden uzaklaştıkça azalmaktadır (İlk 8D'lik bölge içerisindeki düşüş 1,5 dB/D iken, 96D'den sonrasında 0.093dB/D olmaktadır).

Şekil 6'da, belirli uzaklıktaki bir alıcı noktada, akışkan hızı değişiminin, akustik karakteristikler üzerindeki etkisi incelenmiştir. Akışkan hızı 2 m/sn ile 8 m/sn aralığında değişmektedir. Akışkan hızının değişimi akustik karakteristiklerin tümüyle değişmesine neden olmaktadır. Akışkan hızı arttıkça hem girdap kopma frekansında hem de ses basınç seviyesinde artış olduğu gözlenmiştir.

Girdap kopma frekansı 2 m/s akışkan hızında 0,19 Strouhal sayısına karşılık gelirken, 4 m/s'de büyük bir artış göstererek bu değer 0,66'ya yükselmiştir. Sonrasında ise doğrusal olarak artmaya devam etmiştir. Benzer şekilde maksimum ses basınç seviyesi 2 m/s akışkan hızında 101 dB civarında iken, akışkan hızı 4 m/s'ye çıktığında önemli bir artış göstererek 114 dB civarına yükselmiş, sonrasında akışkan hızı ile birlikte artmaya devam etmiştir.

Şekil 5. Alıcı Nokta Uzaklığının Ses Basıncı Düzeyine Etkisi (SST k- $\omega$  türbülans modeli)Şekil 6. Akışkan Hızının Ses Basıncı Düzeyine Etkisi (SST k- $\omega$  türbülans modeli)

## DEĞERLENDİRMELER

Bir dairesel kesitli silindir etrafındaki akış gürültüsü farklı akustik metotlar kullanılarak incelenmiştir. Yapılan hesaplamalar sonucunda, FW-H denklemleri kullanılarak gerçekleştirilen analizlerin literatürdeki sonuçlarla iyi bir uyum içerisinde olduğu görülmüştür. k- $\epsilon$  akustik modeli ise özellikle geniş bant gürültüsü için yakın sonuçlar vermektedir. Bunun yanında alıcı nokta uzaklığı ve akışkan hızının akış gürültüsüne etkisi incelenmiştir. Alıcı nokta uzaklığının ses basıncı düzeylerini, akışkan hızının ise hem girdap kopma frekansını hem de ses basıncı düzeylerini etkilediği belirlenmiştir. Gelecek çalışmalarda, akış alanı hesaplamaları üç boyutlu gerçekleştirilerek ve farklı türbülans modelleri kullanılarak, daha yüksek doğrulukta akış gürültüsü analizleri gerçekleştirilebilir. Bunun yanında, akış gürültüsüne etki eden farklı parametreler incelenebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] Strouhal, V. (1878). "Ueber eine besondere Art der Tonerregung" (On an unusual sort of sound excitation). Annalen der Physik und Chemie, 3rd series, 5 (10), 216–251.
- [2] Lighthill, M (1952), "On sound generated aerodynamically, I. General theory", Proceedings of the Royal Society, Cilt. 211, s. 564–587.



- [3] Proudman, I (1952), "The generation of noise by isotropic turbulence", Proceedings of the Royal Society of London, Cilt. A214, s. 119–132.
- [4] Paul Croaker, Alex Skvortsov , and Nicole Kessissoglou (2011), "A Simple Approach to Estimate Flow-Induced Noise from Steady State CFD Data", Proceedings of ACOUSTICS, s.54, Gold Coast, Australia.
- [5] Williams, J. E., & Hawkings, D. L. (1969). Sound Generation by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion. Philosophical Transactions of the Royal Society of London.
- [6] Morfey, C.L. (1976). "Sound radiation due to unsteady dissipation in turbulent flow", J.Sound.Vib. 48.
- [7] J. D. Revell, R. A. Prydz and A. P. Hays, (1997)"Experimental Study of Airframe Noise vs. Drag Relationship for Circular Cylinders".
- [8] Cantwell and D. Coles, (1983) An experimental study of entrainment and transport in the turbulent near wake of a circular cylinder, J. Fluid Mech.
- [9] Norberg, C. (2002). Fluctuating Lift on a Circular Cylinder: Review and New Measurements, J. Fluids and Structures, Vol. 17, No. 1, pp.57-96.
- [10] Watanabe, H., A. Ihara & H. Hashimoto (1996). Hydraulic characteristics of a circular cylinder with a permeable Wall, JSME International Journal, Series B 39.
- [11] Y.-T. Lu , H.-X. Zhang ve X.-J. Pan,(2008). Numerical simulation of flow-field and flow noise of a fully appendage submarine,Shanghai Jiao Tong University.
- [12] Choi, W., Choi, Y., Hong, S., Song, J., Kwon, H. ve Jung, C., 2016. Turbulence-induced Noise of a Submerged Cylinder Using a Permeable FW-H Method, INJAOE, 2016, 1-8.
- [13] Li Chen, Ian MacGillivray (2011), "Characteristics of sound radiation by turbulent flow over a hydrofoil and a bare-hull SUBOOF", Proceedings of Acoustics Sy:105, Gold Coast, Australia.
- [14] Yo-Seb Choi, Woen-Sug Choi, Suk-Yoon Hong, Jee-Hun Song, Hyun-Wung Kwon, Han-Shin Seol, Chul-Min Jung (2017), "Development of formulation Q1As method for quadrupole noise prediction around a submerged cylinder.", International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 1-8.
- [15] Huilan Yao, Huaixin Zhang, Hutao Liu, Wencheng Jiang (2017), "Numerical study of flow-excited noise of a submarine with full appendages considering fluid structure interaction using the boundary element method.", Engineering Analysis with Boundary Elements 1-9.
- [16] Liang C. & G. Papadakis, (2006). Large eddy simulation of pulsating flow over a circular cylinder at subcritical Reynolds number, King's College London, Strand, London.
- [17] Croaker P., A. Skvortsov & N. Kessissoglou (2011). A Simple Approach to Estimate Flow-Induced Noise from Steady State CFD Data, Proceedings of ACOUSTICS, s.54, Gold Coast, Australia.
- [18] Park C.-W. & S.-J. Lee (2002). Flow structure around a finite circular cylinder embedded in various atmospheric boundary layers, The Japan Society of Fluid Mechanics and IOP Publishing Ltd.
- [19] Orselli R. M., J. R. Meneghini & F. Saltara (2009). Two and Three-Dimensional Simulation of Sound Generated by Flow around a Circular Cylinder, 15th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference (30th AIAA Aeroacoustics Conference) Miami, Florida.
- [20] Casalino, D. & M. Jacob (2003). Prediction of Aerodynamic Sound from Circular Rods via Spanwise Statistical Modelling, J. Sound and Vibration, Vol. 262, No. 4, pp. 815-844.